

时域同步平均技术在直升机主减速器故障诊断中的应用分析

沈勇, 翟秀梅, 李兴旺

(故障诊断与健康管理技术航空科技重点实验室, 上海 201601)

摘要: 由于直升机主减速器的结构特点致使振动信号的信噪比很低, 给故障特征的提取带来了难度; 文中以某型直升机的主减速器为研究对象, 开展时域同步平均技术在主减速器故障特征提取上应用的深入研究, 分析了该技术在实际中的应用以及在实际应用过程中的误差影响, 在此基础上提出了时域同步平均误差分析的改进方法, 通过在直升机主减速器飞行数据的对比应用分析, 证明该方法的可行性和有效性, 并能在一定程度上提高故障特征提取的精度。

关键词: 时域同步平均; 主减速器; 误差分析; 故障诊断

Time Synchronous Averaging (TSA) Technology Applied in Helicopter Main Reducer Fault Diagnosis Analysis

Shen Yong, Zhai Xiumei, Li Xingwang

(Key Laboratory of Aviation Technology for Fault Diagnosis and Health Management Research, Shanghai 201601, China)

Abstract: With the structure characteristic of helicopter main reducer, the vibration signal of it has often low signal-to-noise ratio, which makes it difficult to extract fault feature. In this paper, based on a certain type of helicopter's main reducer as the research object, carried out the Time Synchronous Averaging (TSA) technology in application of in-depth study on the main reducer fault feature extraction, and analyzed the application of this technology in the practical and the error affect, on the basis of this puts forward the improved method of TSA's error analysis. The method is proved to be effective in application of based on the analysis of flight data of helicopter main reducer, and can improve the accuracy of fault feature extraction partly.

Keywords: time synchronous averaging; main reducer; error analysis; fault diagnosis

0 引言

主减速器是直升机传动系统的核心部件, 主减速器的故障往往会引起灾难性事故, 据统计, 在直升机飞行事故中, 68%机械故障的事故是由传动系统引起的, 开展直升机主减速器的故障诊断具有十分重要的意义。由于直升机主减速器的结构特点, 致使早期故障特征较为微弱, 在主减速器的强噪声背景下难以准确的提取出来, 同时主减速器壳体上传感器测得的振动信息相互干扰重叠导致其各部件的信息难以分离, 因此, 在直升机主减速器故障诊断中, 如何准确的从振动信号中提取出与主减速器状态有关的特征信息, 实现信号分离是进行有效诊断的关键问题之一。时域同步平均 (Time Synchronous Averaging, TSA) 技术可以实现从混有噪声干扰的信号中提取周期性信号, 通过对该技术的深入研究发现可以为直升机主减速器微弱特征信号处理提供新的方法和研究手段。

近年来, 国内外研究学者对齿轮、轴、轴承、齿轮箱等的故障诊断研究取得了一些重要的研究成果^[1-5], 但对主减速器的故障诊断还处于探索阶段。本文通过开展时域同步平均技术在直升机主减速器特征提取的应用研究, 分析了该技术在实际应用上的误差影响, 并提出了基于振动信号的时标相位补偿的

时域同步平均技术, 为直升机主减速器的故障诊断研究提供了一种新的方法和应用前景。

1 时域同步平均技术原理及作用^[6-8]

1.1 时域同步平均技术原理分析

时域同步平均是从噪声干扰的信号中提取周期性信号的过程, 也称相干检波。其实现过程是对测得的机械振动信号以一定周期为间隔去截取信号, 然后通过将所截取的各段信号段进行叠加平均, 消除了信号中的非周期分量和随机干扰, 保留了所需的确定的周期分量。

对信号 $g(t)$ 以采样频率 f_s 在起始时刻 t_n 采样, 可以得到 N 段数据长度为 R 个采样点的数据段 $\{x_n(r)\}$:

$$x_n(r) = g\left(\frac{r}{f_s} - t_n\right) \quad r = 0, 1, \dots, R-1 \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

其中: t_n 为第 n 个采样数据段的采样起始时刻。 N 称之为平均段数。

如果这些数据段起始时刻对应于同一时刻标志, 则这些数据段是同步的, 对这些数据段平均可以得到新的数据段。

$$y(r) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n(r) \quad r = 0, 1, \dots, R-1$$

$y(r)$ 称为时域同步平均信号。

与通常的信号不同, 获得时域同步平均信号不仅要获取振动信号, 还需获取转轴的时标脉冲。

1.2 时域同步平均技术作用分析

1) 对随机信号的抑制: 可使随机噪声的功率得到了削减,

收稿日期:2014-04-08; 修回日期:2014-05-23。

作者简介:沈勇(1974-),男,江苏泰州人,博士,研究员,主要从事航天测试技术、故障诊断技术、试验验证与数据处理方向的研究。

削减的程度与平均的段数 N 成正比，为提高抑制效果，应尽可能多的平均段数。

2) 对非同步信号的抑制：振动信号往往包含多个来自不同振源的周期信号，这些振动信号因为频率的不同，互相之间绝大多数是非同步信号。采用该技术可以提取所关心的周期信号，抑制信号内的其他周期信号以提高信噪比。

3) 提高转频幅值计算精度：采用该技术可以得到整周期的时域信号，减少定频采样所导致的非整周期现象，从而提高了频谱分析时幅值的计算精度。

2 时域同步平均技术在直升机主减速器上的误差分析

2.1 时域同步平均技术在直升机主减速器上的应用

由于转速传感器的安装以及实时监测等问题，在直升机上主要采用基于重采样的时域同步平均法^[9]实现直升机主减速器的特征提取，该方法的主要思想是在主减速器上安装一个转角传感器获取时标信号，同时对多个振动信号定频采样，根据传动比将单个时标信号转化为多个需获取的时标信号，对振动信号进行分段重采样后平均，其实现方式如图 1 所示。

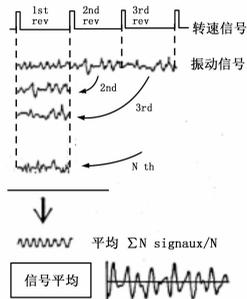


图 1 时域同步平均技术在直升机主减速器上的应用过程

2.2 对直升机主减速器特征提取的影响分析

上述方法在实际使用过程中存在两个重要的影响因素：

(1) 重采样插值方法对信号还原精度的影响，见文献^[10]；

(2) 时标精度对数据分段精度的影响，在此主要深入分析时标精度对主减速器特征提取精度的影响并找出相应的解决方法。

时域同步平均技术应用于直升机主减速器特征提取时，由于时标的误差会引起截取的各段数据中包含各信号频率的起始相位出现偏差，从而在各段数据进行叠加平均时导致信号出现不同程度的衰减。

设截取的两段信号分别为：

$$y_1(t) = A\cos(2\pi mft + \varphi_1)$$

$$y_2(t) = A\cos(2\pi mft + \varphi_1 + \varphi')$$

其中： A 为信号幅值； f 为信号频率； φ_1 为信号初始相位； φ' 为两段信号初始相位差，可以表示为 $\varphi' = 2\pi \times t' \times f$ ，其中 t' 为时标误差。

对两段信号进行叠加平均后得到信号 $y(t)$ ：

$$y(t) = (A\cos(2\pi mft + \varphi_1) + A\cos(2\pi mft + \varphi_1 + \varphi'))/2 =$$

$$A\cos(2\pi mft + \varphi_1)\cos(\frac{\varphi'}{2}) =$$

$$A\cos(2\pi mft + \varphi_1)\cos(\pi ft')$$

由上式可以看出，当存在时标误差时，会导致叠加信号的

初始相位不一致，从而进行叠加平均后的信号的幅值存在一定程度的衰减。

分析时标误差对信号衰减程度的影响可以发现，由于时标误差相对比较小，在对主减速器的旋转轴的低频信号进行叠加平均时， $\pi ft' \approx 0$ ， $\cos(\pi ft') \approx 1$ ，叠加平均后的信号的衰减较小，不影响实际的应用，但当对主减速器内部的齿轮进行分析时，由于齿轮的啮合频率较高，较小的时标误差也会导致较大的相位差，从而导致啮合频率幅值衰减较大，较大影响了与啮合频率相关特征提取的准确性。

2.3 时标误差影响分析

由上面分析可知，时标的误差会导致对振动特征提取的误差，这较大的限制了时域同步平均技术在直升机主减速器上的应用，需要分析其产生误差的原因，减小其影响作用。

1) 信号取整截取时引起的相位误差

在时域同步平均实现过程中，根据多段转速脉冲截取数据段，原理上每段数据的起始相位是一致的，然而对于定频率采样做不到信号的整周期采样，而信号截取时只能按整数点截取，由此引起每个数据段起始相位的波动。如图 2，对于采样点 m_1 和 m_2 在信号截取时每个时标信号对应的采样点会有一定偏差，使每个数据段的起始相位有偏差。

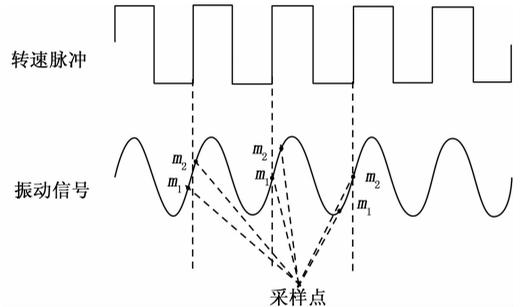


图 2 信号取整时引起的误差示例图

2) 时标波动引起的相位误差：由于被测轴上的磁条与转速传感器之间的相对跳动、外界环境的干扰或转速传感器的波形畸变等，引起时标信号的波动从而导致相位偏差。图 3 为随振动信号一起记录的转速传感器脉冲，旋转轴每转一次的脉冲间隔在 520 到 523 之间波动。

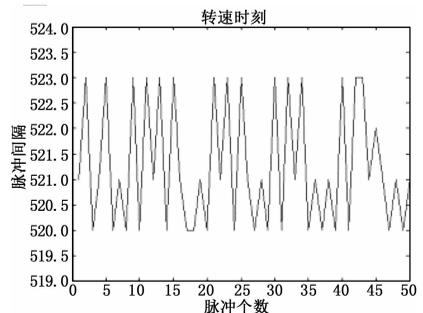


图 3 飞行时转速传感器时标脉冲的波动

3 时域同步平均技术的改进方法研究

由上可知，时域同步平均技术在主减速器特征提取的应用中由于时标的误差会导致提取特征精度存在较大的误差，因此需要开展该技术的改进方法研究以减少对有用信号的抑制作用。根据上述原因分析，采用增加信号采样频率、在时域同步

平均之前对数据进行重采样、减少平均段数、提高时标精度等方法可部分解决时标误差的问题, 但是对于在实际应用过程中存在的时标波动导致的误差不能有效解决, 本文针对上述问题提出了一种新的方法, 基于振动信号的时标相位信息补偿法, 可有效的提高时域同步平均分析精度。

3.1 基于振动信号的时标相位补偿方法

由于转速传感器提供的时标信号存在波动导致相位误差, 而测得的振动信号中存在着相关的相位信息, 因此可以设想从测得的振动信号中提取相关相位信息实现对时标信号的补偿来较少时标信号的相位误差, 从而提高时域同步平均技术的应用效果。

根据齿轮箱振动模型, 振动信号 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K X_k (1 + a_k(t)) \cos(2\pi k f_m t + \psi_k(t) + \phi_k) + b(t)$$

式中, X_k 为第 k 阶啮合频率的幅值, f_m 是 1 阶啮合频率, $a_k(t)$ 和 $\psi_k(t)$ 是第 k 阶啮合频率信号的幅度和相位调制, ϕ_k 为第 k 阶啮合频率信号的初始相位, $b(t)$ 为背景噪声。

根据振动模型若从振动信号中提取出第 k 阶的相位调制信号 $\psi_k(t)$, 对应旋转轴的角度位置信息 $\phi_k(t)$ 即可从下式中得出, 然后即可对时标信号的相位误差进行补偿。

$$\phi_k(t) = \frac{\psi_k(t)}{kN} + 2\pi \frac{f_m}{N} t$$

式中, N 为旋转轴上齿轮齿数。

基于以上分析, 进行相位补偿的关键是准确的提取第 k 阶的相位调制信号 $\psi_k(t)$, 该信号可以通过以下过程进行提取:

- 1) 对通过时标信号截取的振动信号进行频谱分析, 检测啮合频率的峰值点, 由于转速存在波动, 在啮合频率标称值的 $\pm 5\%$ 范围内寻找峰值点;
- 2) 在频谱图上选取以啮合频率峰值点为中心, 以对应轴转频的一半为半径的范围计算信噪比, 通过信噪比选取合适的各阶啮合频率; 其中信噪比的大小决定了相位调制信号的相位误差:

$$\sigma(\delta\psi_k) = \frac{1}{\sqrt{2}} 10^{\frac{-SNR_k}{20}}$$

式中, $\delta\psi_k$ 为相位误差, SNR_k 为第 k 阶啮合频率解调带宽内的信噪比。

- 3) 以选取的啮合频率峰值点为中心, 以对应轴转频的一半为半径的范围进行带通滤波, 从得到的信号中提取出相位调制信息 $\varphi_k(t)$ 。

由上可得基于振动信号的时标相位信息补偿法实现方式如下:

- 1) 获取转速计的时标脉冲, 依据时标脉冲截取包含转速计测量轴及齿轮的振动信号;
- 2) 计算各段重采样信号中的转速计测量轴上齿轮啮合频率的相位偏移量, 并转换为转速计各个时标的相位偏移量;
- 3) 根据相位偏移量修正转速计的各个时标, 依据修正的时标比例合成, 生成各轴对应的时标;
- 4) 根据各轴对应的时标截取数据段, 并重采样各段数据, 同时对各段数据平均, 得到时域同步平均信号。

3.2 分析验证

为了验证时标误差对主减速器振动特征提取的影响以及基于振动信号的时标相位补偿的时域同步平均方法的效果, 我们

在故障诊断与健康管理的航空科技重点实验室进行了直升机主减速器尾输出轴处振动测量分析实验, 图 4 为直升机传动系统试验台, 试验台上主减速器尾输出传动齿轮齿数为 16, 在试验中主减尾输出轴工作转速为 4 125 转/分, 此时齿轮一阶啮合频率为 1 100 Hz。试验中测试系统为美国 IMC 公司的 SL4 数据采集系统, 采样频率为 32 kHz, 一次采样点数为 64 k。

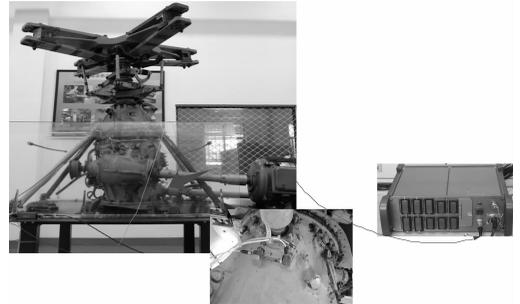


图 4 直升机传动试验台

首先对该处测的振动信号采用未改进的时域同步平均方法进行分析, 分别取时域平均段数为 20 段和 50 段, 结果如图 5 所示。

由图 5 可见在 32 阶分量 (2 200 Hz) 上出现幅值衰减, 在 48 阶分量 (3 300 Hz) 上出现了幅值的严重衰减, 而且由

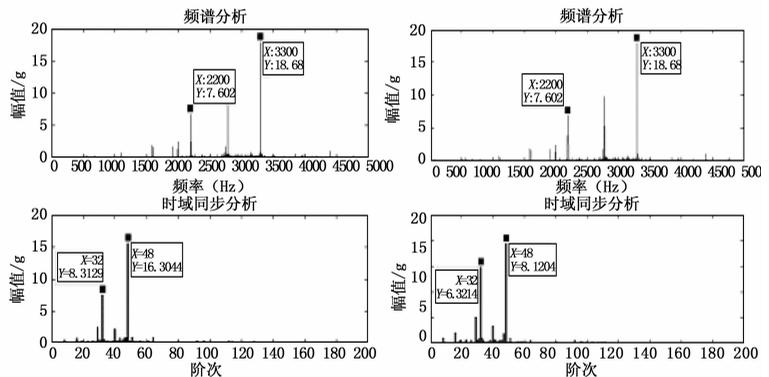


图 5 直升机主减速器尾输出轴处数据分析 (20 段与 50 段平均)

于时标的误差, 随着平均段数的增加, 48 阶分量幅值出现了较大的衰减, 此时不能充分发挥该方法的作用。

同时采用基于振动信号时标相位补偿的时域同步平均方法对同样数据进行了分析, 选取平均段数为 50 段, 其结果如图 6 所示。

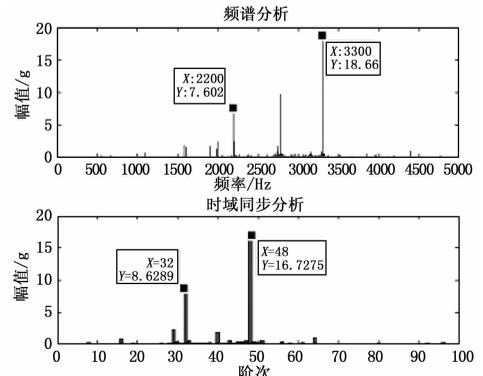


图 6 直升机主减速器尾输出轴处数据分析 (50 段, 方法改进后)